

分类号:

学号:0502202

天津城市建设学院

Tianjin Institute of Urban Construction



硕士学位论文

M. S. DISSERTATION

学科专业: 结构工程

研究方向: 工程结构抗震

作者姓名: 冉令譔

指导教师: 罗兆辉 副教授

天津城市建设学院土木工程系

二00七年

建筑模网混凝土结构体系的抗震分析

Analysis of Seismic behavior for Concrete structure with permanent shuttering kit

硕士研究生: 冉 令 讓

所在系名称: 土木工程系

学科专业: 结 构 工 程

研究方向: 工程结构抗震

指导教师: 罗兆辉 副教授

通过答辩时间: 2007年12月27日

授予学位时间: _____

授予学位单位: 天津城市建设学院

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得天津城市建设学院或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：卞金强 签字日期：2007年12月29日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解天津城市建设学院有关保留、使用学位论文的规定。特授权天津城市建设学院可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：卞金强

导师签名：罗明辉

签字日期：2007年12月29日

签字日期：2007年12月29日

摘 要

模网混凝土结构是一种新型的结构体系,其发展和应用顺应了我国墙体材料改革需要。为了实现其在我国地震区的推广和应用,本文对其抗震性能进行了分析和研究。

本文对该结构体系的发展情况做了简要的介绍,阐述了非线性静力分析方法(Push-Over)的理论基础,并对本文所使用的各种软件的作用和特点一一作了介绍。

首先,利用大型有限元通用软件 ANSYS 对几种不同规格的单面墙体的性能进行了建模分析。得出了在荷载作用下的荷载和位移结果,以及其裂缝和所受应变的分布图形。总结出这一新型复合材料的较为合理的本构关系。

其次,运用总结出的模网混凝土墙体的本构关系,在 ETABS 建筑结构专用分析与设计软件中输入,对工程实例进行了模网混凝土剪力墙结构的整体抗震性能分析。并和 PKPM 系列的 SATWE 软件的计算结果进行了对比分析,证明了 ETABS 软件适用于设计模网混凝土结构。并通过大量算例总结出结构高度和墙肢轴压比对模网结构抗震性能的影响。

最后,对以上的分析结果进行了总结,并提出了关于进一步深入研究模网混凝土结构技术的若干建议。

关键词: 模网混凝土结构; 非线性静力分析(Push-Over); 抗震性能; 轴压比

ABSTRACT

Concrete structure with permanent shuttering kit is a new structural system whose developments and applications adapt well to the reformation of wall material in China. In order to realize the popularization and application of concrete structure with permanent shuttering kit in seismic zone, the seismic performance of this structure is discussed and analyzed in this paper.

The developments of new structure styles are introduced in brief, as well as the theory of nonlinear static analysis (Push-Over). The software which is used in this paper are introduced.

First, the finite element analysis of different scales of concrete wall with permanent shuttering kit is employed using the software of ANSYS, and then we get the result of the load effect which is under the displacement load, and the area of the crack and strain. Meanwhile, we have a reasonable constitutive relation for the new composites materials.

Second, the analysis of the seismic performance of the concrete structure with permanent shuttering kit which has a new constitutive relation is employed using the software of ETABS. And we find that it is a reasonable way to analyze the new system. The method of the software is introduced particularly, which is compared with other software of SATWE. We also receive a conclusion that the height of the structure and the ratios of axial compression affect the seismic behavior of the structure.

Finally, conclusions are deduced according to the results. We suggest that we should improve the disquisition on concrete structure with permanent shuttering kit.

Key words: Concrete structure with permanent shuttering kit; Nonlinear static analysis(Push-Over); Seismic behavior; ratios of axial compression

目 录

摘 要	1
ABSTRACT	2
第一章 绪论	1
1.1 建筑模网混凝土结构的发展和研究现状	1
1.1.1 建筑节能新型结构体系的发展概况	1
1.1.2 建筑模网技术在国内外的研究现状	1
1.1.3 建筑模网技术介绍	2
1.1.4 目前在理论和应用上存在的问题	3
1.2 本文研究内容	4
第二章 使用软件简介	5
2.1 ANSYS 软件简介	5
2.2 ETABS 软件介绍	6
2.3 PKPM 软件介绍	8
第三章 非线性静力分析（PUSH—OVER）方法概述	10
3.1 简介	10
3.2 主要内容	10
3.2.1 结构荷载—位移曲线图	10
3.2.2 结构抗震能力的评估	11
3.3 谱线的建立	12
3.3.1 承载力谱的建立	12
3.3.2 ADRS 谱（需求谱）的建立	12
第四章 模网混凝土墙体的性能分析	14
4.1 ANSYS 软件分析	14
4.2 本构关系	14
4.2.1 假设条件	14
4.2.2 混凝土的应力—应变曲线的数学模型	15
4.2.3 钢筋的应力—应变曲线的数学模型	15
4.2.4 屈服准则	15
4.3 计算模型	16
4.3.1 墙体示意图	16
4.3.2 单元说明	18

4.3.3 单元选取	20
4.4. ANSYS 软件计算及分析	20
4.4.1 建模分析	20
4.4.2 计算结果的数据分析	21
4.4.3 计算结果的图形分析	21
4.5 模网结构的复合材料特性	23
4.5.1 复合材料的应力	23
4.5.2 复合材料的弹性模量	23
第五章 模网混凝土结构体系的抗震性能分析	25
5.1 工程算例概述	25
5.1.1 工程建筑情况	25
5.1.2 设计所需的规范及规程	30
5.1.3 设计条件	30
5.2 运用 ETABS 软件进行工程算例的抗震性能分析	31
5.2.1 建立轴网	32
5.2.2 确定楼层	32
5.2.3 材料定义	33
5.2.4 楼板截面和墙截面定义	33
5.2.5 绘制面对象	34
5.2.6 节点约束的指定	34
5.2.7 剖分对象	34
5.2.8 运行程序	35
5.2.9 计算结果分析	35
5.3 运用 PKPM 软件对工程算例进行对比分析	40
5.3.1 主要参数	40
5.3.2 分析结果	41
5.3.3 结论	43
5.4 不同层数模网结构的抗震性能分析	44
5.4.1 五个不同高度结构的基本情况	44
5.4.2 结构层间侧移结果	45
5.4.3 结构首层的墙体轴压比结果	47
5.4.4 结构承载力的计算结果	49
5.4.5 结论	49
5.5 模网结构的静力非线性分析	50
5.5.1 结构的 Pushover 分析	50
5.5.2 Pushover 分析结果	51
第六章 结论和建议	53

6.1 结论	53
6.2 建议	54
参考文献.....	55
发表论文和参与科研情况	57
致谢	58

第一章 绪论

1.1 建筑模网混凝土结构的发展和研究现状

1.1.1 建筑节能新型结构体系的发展概况

为了实施可持续发展战略，构建和谐节能社会，国家对建筑节能方面给予了高度的重视，并先后出台了一系列政策，减少甚至避免因发展而带来的对环境的破坏，相继出台了逐步禁用粘土砖和强制性建筑节能政策；《建筑节能管理条例》已经列入了国务院的一类立法计划。同时鼓励新技术、新产品、新工艺的推广应用。在这种形式之下，先后出现了各种形式的节能的建筑材料。使得节能住宅建筑推广开来。

1.1.2 建筑模网技术在国内外研究现状

建筑模网技术是由法国建筑材料和结构专家杜朗夫妇共同发明的，其正式通过了法国建筑权威机构国家建筑科技研究院（CSTS）的技术鉴定。该产品目前已在法国、瑞士、比利时、德国、美国等国家的工程中得到广泛应用。适合于各种结构体系的工业建筑和民用住宅的内外墙体、楼梯及屋盖等，也可用于水工建筑物、构筑物如水池的侧壁、顶底板、堤坝、堰涵，同时也可灵活多样地与其它砌体或混凝土墙体组合使用，而且在原有旧建筑的修缮和改造方面有很多的工程应用经验。

大连方面将建筑模网技术引进中国，通过了建设部的认证，并被建设部中国工程建设标准化协会批准为工程建设推荐产品。帝枇建筑模网相关技术是符合现阶段中国国情、能够有效解决墙体改革与建筑节能关系的先进技术。已经被列入建设部科技成果推广转化指南项目、国家康居示范工程选用部品与产品。现建筑模网技术的地方标准《建筑模网混凝土结构技术规程》（DB21/T1210-2004）编制完成，并开始实施。这些实践和试验均证明了模网混凝土结构是相似于普通混凝土剪力墙的一种新的结构体系。相信随着相关规程、标准的出台，该技术会得到越来越广泛的应用，将为社会提供更多优质价宜的康居。

建筑模网在国内、外有很多工程实例。

国外项目：法国巴黎电信建筑、法国巴黎公寓、法国巴黎电视广播中心、澳洲悉尼黄金海岸公寓、美国盐湖城滑雪度假酒店等；

国内项目：北京市伟业嘉园住宅项目、北京公安局办公楼加固工程、瓦房店长兴岛体育馆、山西大学阶梯教室工程、中井木业有限公司干燥窑和冷库工程、大连

栾金村43 住宅楼、大连维多利亚山庄(别墅)、辽宁省省长办公楼加固工程、大连市国家康居示范工程锦华园住宅楼等。

1.1.3 建筑模网技术介绍

建筑模网为一种免拆模(永久性)、滤过性的用于制备混凝土构件的模板,建筑模网的两面由竖向镀锌加劲肋(俗称龙骨)和钢板网组成(如图1-1所示)。通过普通线材制成的拉筋将两面连接成三维网架,在工厂制作而成。当用于外墙时,可在一面整合保温材料,如聚苯板等。这样,现场浇筑混凝土后便可制成一次现浇成型的集承重和外保温于一体的复合模网混凝土墙体^[1]。建筑模网在世界各地得到了广泛的应用。

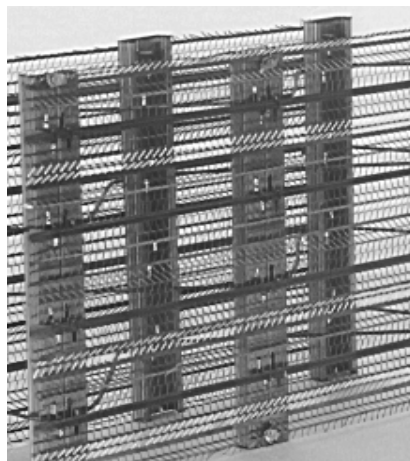


图1-1 建筑模网

模网混凝土结构的特点为:

1. 显著降低造价

曾经就某项目中的1个9层住宅,进行了短肢剪力墙方案(该住宅的实际结构方案)与帝枇模网墙方案的比较,发现有三项造价大幅降低:

(1) 钢筋: 由于帝枇模网为工厂生产的定型产品,出厂时已包含了部分钢筋,并且其设计是按照普通剪力墙举行的,因此其用钢量比短肢墙方案大幅减少(仅为34.11%),平均少用钢筋 $29.71\text{kg}/\text{m}^2$ 。

(2) 外墙外保温: 由于帝枇模网的外墙自带保温层,因此该住宅的外墙只有很少的填充墙需要另做外保温,因此花在外保温上的造价也大幅减少,仅为短肢墙方案的38.16%。

(3) 施工措施费: 由于帝枇模网墙体在施工时不需搭拆模板,因此支模等施工

费用大幅降低，仅为短肢墙方案的 34.86%。

2. 施工速度快

由于帝枇建筑模网可实现工厂化生产，现场装配化，而且模网本身自带外保温材料，因此可将常规土建主体施工的几道工序（绑筋、支模、做外保温等）整合为一道工序，保温层与结构墙体紧密相连，可靠锚固。由此减少了二次保温的施工工序^[2]，生产速度和效率自然会显著提高。

3. 房屋整体性好，抗震性能优越

模网混凝土结构的建筑其承重墙体(模网墙体)、楼板、楼梯等重要结构构件均为现浇混凝土，其整体性能较好。为了解模网混凝土墙体的力学性能，该结构体系在中国建筑科学研究院结构所进行了《帝枇模网混凝土剪力墙力学性能试验》，共包括35片墙，其中2片剪跨比为0.5的水平施工缝抗剪性能试验；22片剪跨比为1的抗剪性能试验；8片剪跨比为2的抗剪性能试验；3片剪跨比为2.7的抗弯性能试验。试验结果表明，模网混凝土墙体的抗剪承载力与普遍混凝土剪力墙相近，破坏形态相似^[3]。

4. 外墙保温工艺可靠、墙面质量高

为了达到“三步节能”的要求，对于外墙保温而言，天津地区是采用在墙体外侧粘贴聚苯板的外保温工艺，但其强度及耐久性都较差，使用寿命一般不会超过十年。而模网保温墙体是将聚苯板置入模网内，与结构连成整体，使用寿命与模网相同，极大改善了其耐久性。在外墙抹灰及墙面质量上，模网有更明显优势。由于模网与钢丝网作用类似，因此无需抗裂钢丝网就可以保证墙体混凝土和墙面抹灰不开裂。

5. 模网混凝土结构住宅的有效使用面积可观

同普通混凝土框架结构的住宅建筑相比，模网混凝土结构的建筑物不仅室内无突出的梁、柱。更重要的是其套内有效使用面积增大。由于模网墙比传统的墙体薄，每百平米的房屋可增加使用面积4到6平方米。

1.1.4 目前在理论和应用上存在的问题

目前我国对建筑模网的研究多为从建筑材料的角度去研究其耐久性、抗裂性、保温性等方面^{[4] [5] [6] [7]}。如王立久等人就碳化试验、冻融循环试验、抗氯离子渗透试验对模网混凝土墙体耐久性的研究，模网混凝土的节能保温性能的研究；史巍、侯景鹏从砂浆尺寸的稳定性和模网温度变形特点等对模网混凝土抗裂性能的研究。而模网混凝土板的抗弯性能等力学性能方面的研究所做的工作还很少。

另一方面由于其水平方向的钢筋在整个墙面上不连续，在剪力如何传递的问题上还不是很清楚。而且辽宁的地方规程在轴压比和高度限制等方面的研究还很少，因此出于安全考虑对轴压比和高度的限制较为严格，在一定程度上限制了其应用。同时，在天津地区的场地条件与东北地区有很大的差别，抗震设防烈度也不相同，

因此模网结构在天津市的应用不能照搬辽宁省的地方标准。本文将结合天津地区的实际情况，在轴压比、高度限制等影响因素上对建筑模网结构体系进行抗震分析等方面的研究工作，以便于其推广和发展，以创造更大的社会和经济效益。

1.2 本文研究内容

1. 利用 ANSYS 软件对单片模网混凝土墙体进行受力性能分析
2. 利用 ETABS 软件进行结构进行基于性态的静力非线性分析 (push-over)
3. 重点研究结构层高与层数改变即轴压比改变对结构抗震性能的影响，为在高层建筑中大量应用建筑模网结构体系开展基础研究工作。

第二章 使用软件简介

2.1 ANSYS 软件简介

近40年来，随着计算机的飞速发展和广泛应用，各种行之有效的数值计算方法得到了巨大的发展。而有限元方法则是计算机诞生以后，在计算数学、计算力学和计算工程科学领域里诞生的最有效的计算方法。随着有限元理论基础的日益完善，出现了很多通用和专用的有限元计算软件。

ANSYS公司成立于1970年，总部位于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡，目前是世界计算机辅助工程(CAE)行业中最大的公司。ANSYS公司一直致力于分析设计软件的开发、维护，不断吸取当今世界最新的计算方法和计算机技术，领导着有限元界的发展趋势，并为全球工业界所广泛接受，拥有全球最大的用户群。

ANSYS公司的ANSYS软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件，可广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等一般工业及科学研究。

在世界范围内，ANSYS软件已经成为土木建筑行业CAE仿真分析软件的主流。在钢结构和混凝土房屋建筑、体育场馆、桥梁、大坝、隧道以及地下建筑物等工程中得到了广泛的应用，通过它可以对这些结构在各种外荷载条件下的受力、变形、稳定性及各种动力特性做出全面的分析，为土木工程师提供了功能强大且方便易用的分析手段。ANSYS在国内的很多大型土木工程中都得到了应用，如上海金茂大厦、国家大剧院、三峡工程等都利用了ANSYS软件进行有限元仿真分析。

ANSYS有限元分析软件具有强大的功能，其主要的技术特点为：

- 惟一实现前后处理、求解及多场分析统一数据库的一体化大型FEA分析软件；
- 具有强大的非线性分析功能；
- 具有使用于不同的问题和硬件配置的多种求解器；
- 强大的并行计算功能，支持分布式并行和共享内存式并行；
- 多种用户网格划分技术；
- 完善的用户开发环境。

2.2 ETABS 软件介绍

ETABS 是一个完善且易于使用的建筑结构专用分析与设计程序。具有直观、强大的图形界面功能，以及一流的集成于通用数据库中的建模、分析和设计功能。虽然对于简单结构来说ETABS 快速简易，但它也能处理包括广泛的非线性效应在内的、巨大且极其复杂的建筑模型，因此成为建筑行业里结构工程师的首选工具。

ETABS的强大功能和通用性引起了国人的注意。在20世纪80年代初，曾组织人对ETABS的输出文件进行解剖，编制了一个符合中国规范的后处理程序来解决截面设计问题。但是到了20世纪80年代末，我国规范的复杂程度进一步增加，单靠ETABS的输出文件已经不能编制出截面设计的软件了。2000年左右出版的新规范比旧规范的复杂程度更有所增加，采用ETABS只能起结构分析对比的作用，没有办法按中国规范进行截面设计。2003年正式推出的ETABS中文版软件，从根本上解决了和我国新规范结合的问题，达到了国内同类产品的领先水平，其中计算分析技术处于国际领先水平。在软件中全面纳入了中国规范，对我国工程设计起到很大的作用。目前，ETABS 已经发展成为一个建筑结构分析与设计的集成化环境，系统利用图形化的用户界面来建立一个建筑结构的实体模型对象，通过先进的有限元模型和自定义标准规范接口技术来进行结构分析与设计，实现了精确的计算分析过程和用户可自定义的（选择不同国家和地区）设计规范来进行结构设计工作。

ETABS 公认为建筑分析设计国际标准，为世界上主要的标志性建筑所采用，该软件也被数以千计的教育机构作为研究和教育工具。如今，新版的 ETABS 带有完全集成的面向对象的分析、设计、优化、制图和加工数字环境将要在未来的 25 年中重新确立数字技术及其生产力的标准，并且引领一个新的数字技术时代。

我国在与世界接轨的全球一体化趋势中，这种情况已经有所改变，ETABS 已经开始得到我国广大工程设计和科研人员的广泛认可和使用，作为结构方案选型、设计校核常用软件。

ETABS很大程度上提高了工程师的结构分析和设计能力。功能强大的一方面在于，它有一系列选项和功能设置；另一方面，使用该程序的基本方法非常简单。用户可以建立轴线，使用与轴线相关的点、线和面来放置结构对象，并且给这些结构对象指定荷载和结构属性然后可在结构对象和它们的赋值基础上执行分析和设计。可以用能打印到打印机上的图形或表格形式生成结果，或生成一个文件。

ETABS 是一个完全集成化的系统，内嵌在简单直观用户界面下的是非常强大的数值方法、设计过程与国际设计规范，所有这些都是通过一个统一完善的数据库来协同工作的。这样的集成意味着用户仅需建立一个楼板系统以及垂直和侧向框架系统的模型，就能分析与设计整个建筑物。用户所需要的一切都集成到基于Windows 图

形用户界面的一个通用分析与设计软件包。无需外部模块维护，程序与模块之间没有数据转换。结构一部分的变化即时自动地作用在另一部分上。

集成模块包括：

（1）建模功能

ETABS 把建筑物理理想化为面对象、线对象和点对象的集合，这些对象分别用来代表墙、楼板、柱、梁、支撑以及连接/弹簧等物理构件。结构的平面可以是非对称、非矩形的。结果能够精确地反映出楼板的扭转效应以及各层楼板的相互作用与协调。计算结果强调三维空间位移的一致性与协调性，使其能得到相对较小柱距的高层结构性能的筒状效应。可以模拟半刚性隔板以获取楼板平面内变形的效果。楼板对象可在相邻楼层之间跨越以产生倾斜楼板（斜坡），这对于停车库结构的建模来说很有用。不使用人造的（“虚的”）楼板和柱线即可建立部分隔板模型，如夹层、缩进、中庭和楼板开洞。

它也能模拟在每层上建立多个独立的隔板模型，允许建立在相同基础上的多塔结构模型。柱、梁和支撑单元可以是非等截面的，而且在端部连接处可以局部固定。它们也可以有均布、部分均布或梯形分布的荷载模式，而且可以有温度荷载。使用自动计算出的末端偏移量，考虑梁和柱的有限尺寸对框架结构刚度的影响。

楼板和墙可以模拟成只有平面内刚度的膜单元、只有平面外刚度的板弯曲单元或组合了平面内外刚度的壳单元。楼板和墙对象可以具有平面内或平面外的均布荷载模式，而且可以有温度荷载，柱、梁、支撑、楼板和墙对象在连接部位均彼此协调一致。

（2）分析功能

可以对用户指定的作用于楼板或楼层的竖向、侧向荷载进行静力分析。如果模拟具有板弯曲承载力的楼板单元，那么作用在楼板上的垂直均布荷载将通过楼板单元的弯曲传递到梁和柱上。否则，作用在楼板上的垂直均布荷载将自动地转换为相邻梁上的跨间荷载或相邻柱上的节点荷载。因此，不需要进行外在的框架二次模拟，就能自动地完成将楼板附属荷载传递到楼板梁上的繁重工作。

程序能自动生成符合各种不同建筑规范要求的侧向风、地震荷载作用模式。使用特征向量或Ritz 向量分析，可以计算三维空间振型形状和频率、振型参与系数、方向系数及参与质量等。

无论在静力或动力分析中都可以包括P- Δ 效应。可进行反应谱分析、线性时程分析、非线性时程分析以及静力非线性（Pushover）分析。为了包括由于施工顺序所引起的各种力，静力非线性分析功能允许用户进行递增的施工顺序荷载分析。各种不同静力荷载条件下产生的结果可以相互组合，也可与动力反应谱或时程分析的结果进行组合。

2.3 PKPM 软件介绍

PKPM 系列软件是由中国建筑科学研究院开发并在全中国推广的，其中的 SATWE 软件可以用来设计高层建筑结构，是专门为高层结构分析与设计而开发的基于壳元理论的三维组合结构有限元分析软件。其核心是解决剪力墙和楼板的模型化问题，它直接决定了分析模型的科学性，同时也决定了软件分析结果的精度和可信度。因此要尽可能地减小其模型化误差，提高分析精度，使分析结果能够更好地反映出高层结构的真实受力状态。

目前在工程中应用较多的多、高层结构分析软件主要有三类。

第一类是基于薄壁柱理论的三维杆系结构有限元分析软件，薄壁柱理论的优点是自由度少，使复杂的高层结构分析得到了极大的简化。但是，实际工程中的许多剪力墙难以满足薄壁柱理论的基本假定，用薄壁柱单元模拟工程中的剪力墙出入较大，精度难以保证。

第二类是基于薄板理论的结构有限元分析软件，把无洞口或有较小洞口的剪力墙模型化为一个板单元，把有较大洞口的剪力墙模型化为板—梁连接体系。这类软件对剪力墙的模型化不够理想，没有考虑剪力墙的平面外刚度及单元的几何尺寸影响，对于带洞口的剪力墙，其模型化误差较大。

第三类是基于壳元理论的三维组合结构有限元分析软件，由于壳元既有平面内刚度，又具有平面外刚度，用壳元模拟剪力墙和楼板可以较好地反映其实际受力状态。基于壳元理论的多、高层结构分析模型，理论上比较科学，分析精度高。但美中不足的是现有的基于壳元理论的软件均为通用的有限元分析软件，虽然功能全面，适用领域广，但是针对土木工程等某一具体专业的后处理功能较弱，需要用户自己做很多的后处理工作，如根据弯矩计算配筋面积，并进行配筋。这在一定程度上也限制了它在高层结构分析中的应用。

SATWE 采用空间杆单元模拟梁、柱，用在壳元基础上凝聚而成的墙元模拟剪力墙。墙元是专用于模拟多、高层结构中剪力墙的，对于尺寸较大或带洞口的剪力墙，按照子结构的基本思想，由程序自动进行细分，然后用静力凝聚原理将由于墙元的细分而增加的内部自由度消去，从而保证墙元的精度和有限的出口自由度。墙元不仅具有墙所在的平面内刚度，也具有平面外刚度，可以较好的模拟工程中剪力墙的实际受力状态。

SATWE 具有以下的特点：

- 1) SATWE 采用空间杆单元模拟梁、柱及支撑等杆件。采用在壳元基础上凝聚而成的墙元模拟剪力墙。对于尺寸较大或带洞口的剪力墙，按照子结构的基本思想，由程序自动进行细分，然后用静力凝聚原理将由于墙元的细分而

增加的内部自由度消去，从而保证墙元的精度和有限的出口自由度。墙元不仅具有墙所在的平面内刚度，也具有平面外刚度，可以较好地模拟工程中剪力墙的实际受力状态。

- 2) 对于楼板，SATWE 给出了四种简化假定，即楼板整体平面内无限刚、分块无限刚、分块无限刚加弹性连接板带和弹性楼板。在应用中，可根据工程实际情况和分析精度要求，选用其中的一种或几种简化假定。
- 3) SATWE 适用于高层和多层钢筋砼框架、框架—剪力墙、剪力墙结构，以及高层钢结构或钢—砼混合结构。及复杂体型的高层建筑、多塔、错层、转换层及楼板局部开洞等特殊结构型式。
- 4) SATWE 可完成建筑结构在恒、活、风、地震力作用下的内力分析及荷载效应组合计算，对钢筋砼结构还可完成截面配筋计算。
- 5) 可进行上部结构和地下室联合工作分析，并进行地下室设计。
- 6) SATWE 所需的几何信息和荷载信息都从 PMCAD 建立的建筑模型中自动提取生成并有多塔、错层信息自动生成功能，大大简化了用户操作。
- 7) SATWE 完成计算后，可经全楼归并接力 PK 绘梁、柱施工图，接力 JLQ 绘剪力墙施工图，并可为各类基础设计软件提供设计荷载。

第三章 非线性静力分析（Push—Over）方法概述

3.1 简介

静力非线性分析方法（Nonlinear Static Procedure），也称 Pushover 分析法，是基于性能评估现有结构和设计新结构的一种方法。静力非线性分析是结构分析模型受到一个沿结构高度为某种规定分布形式逐渐增加的侧向力或侧向位移，直至控制点达到目标位移或建筑物倾覆为止。控制点一般指建筑物屋顶的型心位置；目标位移为建筑物在设计地震力作用下的最大变形^[8]。

基于结构行为设计使用 Pushover 分析包括形成结构近似需求和能力曲线并确定曲线交点。需求曲线基于反应谱曲线，能力谱基于静力非线性 Pushover 分析。结构受到逐渐增加的荷载和结构的底部剪力、顶部位移。近似需求曲线与能力曲线的交点称为性能点。性能点定义了结构在需求曲线定义的地震作用时评估的结构底部剪力和位移。通过比较结构在性能点的行为与预先定义的容许准则，确定设计目标是否满足。

在结构产生侧向位移的过程中，结构构件的内力和变形可以计算出来，观察其全过程的变化，判别结构和构件的破坏状态^{[9][10][11]}，Pushover 分析比一般线性抗震分析提供更为有用的设计信息。

在大震作用下，结构处于弹塑性工作状态，目前的承载力设计方法，不能有效评估结构在大震作用下的工作性能。静力非线性分析可以评估结构和构件的非线性变形，结果比承载力设计更接近实际。静力非线性分析相对于非线性时程分析，可以获得较为稳定的分析结果^[12]，减少分析结果的偶然性，同时可以大大节省分析时间和工作量^[13]。

3.2 主要内容

静力非线性分析，基本工作分为两个部分：（1）建立侧向荷载作用下的结构荷载—位移曲线图（如图 3—1 所示）；（2）对结构抗震能力的评估^[14]。

3.2.1 结构荷载—位移曲线图

结构承载力曲线确定的步骤如下：

1. 结构计算模型的确定。
2. 结构构件的实际承载力计算。

3. 构件的弹性、开裂和屈曲后刚度的评估。
4. 用 Pushover 分析估计层间侧向刚度和层间位移角。
5. 确定结构承载力曲线。

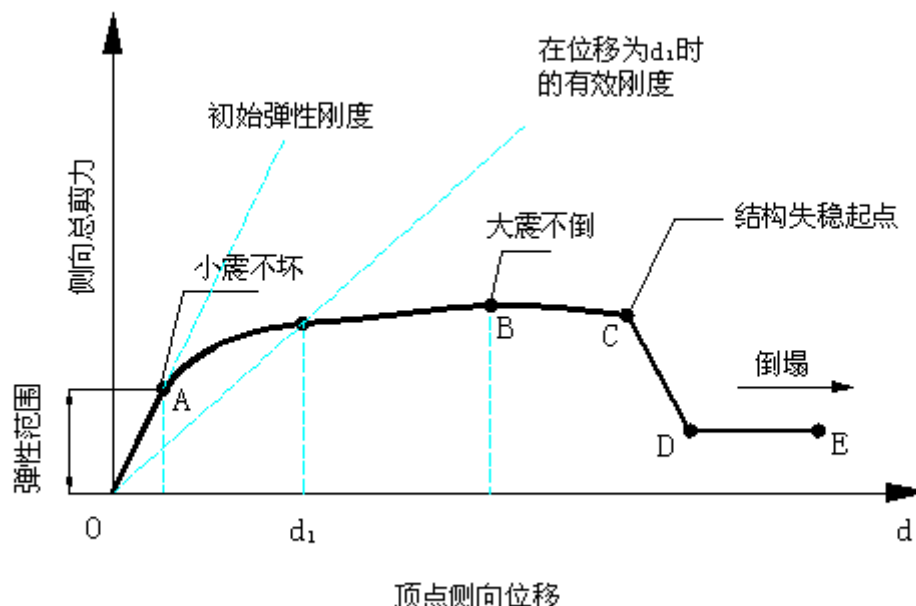


图 3—1 荷载——位移曲线

3.2.2 结构抗震能力的评估

(1) 承载力谱法

这个方法是美国 ATC—40 采用的办法，也是日本新的建筑基准法 (BSL2000) 采用的方法。其基本思想是先建立 5% 阻尼的线弹性反应谱，再用能量耗散效应降低反应谱值，并以此来评估结构的非线性位移。

(2) 目标位移法

这个方法是 FEMA—273 推荐的方法，其基本思想是用一组修正系数，修正结构在“有效刚度”时的位移值，以估计结构的非线性位移。

本文进行抗震能力的评估所采用的方法主要是承载力谱法，其基本思想是：建立两条相同基准的谱线，一条是由荷载—位移曲线转化为承载力谱线（亦称供给谱线），另一条由加速度反应谱转化为 ADRS 谱（亦称需求谱线）把两条谱线放在同一个图上，两两曲线的交点定为“目标位移点”（或“结构抗震性能点”），再同位移容许值比较，确定是否满足抗震要求。

3.3 谱线的建立

3.3.1 承载力谱的建立

为了从承载力曲线 (Pushover Curve 如图 3-2 所示) 转变为承载力谱 (如图 3-3 所示), 需要对每个点做转换。从承载力曲线上任一点的 V_i , $\Delta_{\text{顶点}}$, 转换到承载力谱中相应的点 S_{ai} , S_{di} , 可采用式:

$$S_{ai} = \frac{V_i / G}{\alpha_1}$$

$$S_{di} = \Delta_{\text{顶点}} / \gamma_1 X_{1, \text{顶点}}$$

式中 α_1 —— 第一振型质量系数;
 γ_1 —— 第一振型参与系数;
 $X_{1, \text{顶点}}$ —— 第一振型顶点振幅;
 G —— 结构总重;

3.3.2 ADRS 谱 (需求谱) 的建立

按照 ADRS 格式, 结构承载力曲线与需求谱都是以加速谱对位移谱的坐标来绘制的。

由标准的加速度反应谱 (S_a-T 谱, 如图 3-4 所示) 转换为 S_a-S_d 谱 (谱加速度为纵坐标, 谱位移为横坐标), 便是 ADRS 谱 (如图 3-5 所示)。反应谱曲线上的点, 同谱加速度 S_a 、谱速度 S_v 、谱位移 S_d 和周期 T 有确定的关系, 要从标准的加速度反应谱 S_a-T 模式转换为 ADRS 模式, 必须确定曲线上每一点的相应于 S_{ai} 和 T_i 的 S_{di} 值, 其关系可从下式求得:

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{ai} g$$

标准的需求反应谱包含一组常量的谱加速度和另一组常量的谱速度; 在周期 T_i 处的谱加速度和谱位移有如下的关系。

$$S_{ai} g = \frac{2\pi}{T_i} S_v \quad S_{di} = \frac{T_i}{2\pi} S_v$$

考虑结构非线性耗能性质对地震需求的折减, 当地震作用于结构, 达到非线性状态时, 结构的能量耗散可以视为结构黏性阻尼与滞回环以内的面积大小有关, 因此要设定滞回曲线, 一般采用双线型曲线代表承载力曲线, 来估计有效阻尼, 等效黏性阻尼。

$$\zeta = \frac{E_D}{4\pi E_s}$$

式中 E_D ——阻尼耗能，等于由滞回环包围的面积
 E_s ——最大的应变能

为建立地震需求谱，用参数计算折减系数，对 5%阻尼的 ADRS 谱进行折减为地震需求谱。承载力谱与调整后的需求谱放在同一个 ADRS 图上，两组曲线有个交汇点，如果这个交点与与 (a_p, d_p) 点，则计算过程须重复进行，直至达到满意为止。

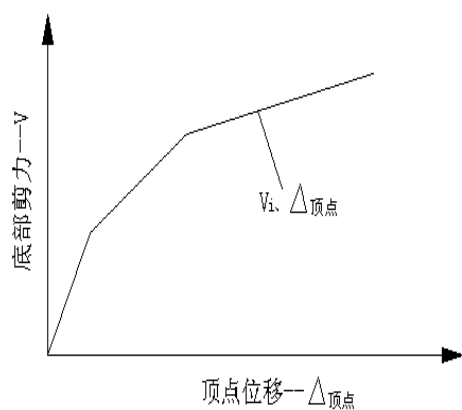


图 3-2 承载力曲线

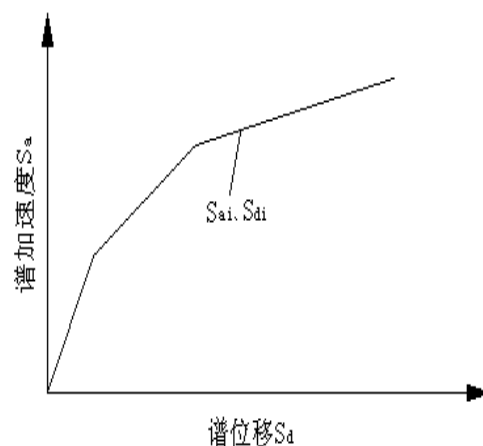


图 3-3 承载力谱

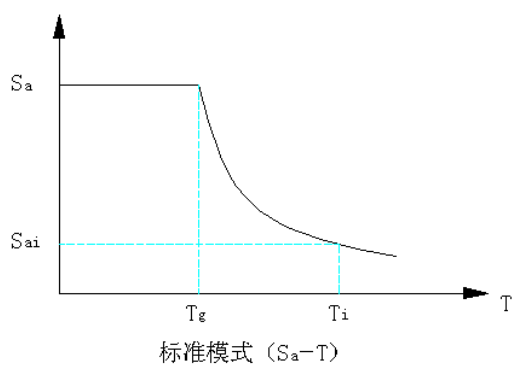


图 3-4 加速度反应谱

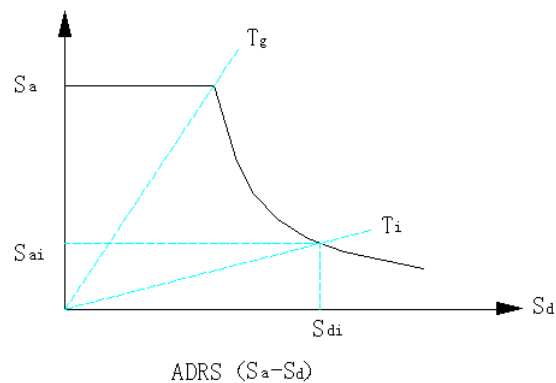


图 3-5 ADRS 谱

第四章 模网混凝土墙体的性能分析

4.1 ANSYS 软件分析

ANSYS软件为大型通用的有限元计算软件，其功能强大，计算精度高，结果可靠，工作效率很高。准确的单元类型，并对所建的模型进行合理的网格划分以便最接近实际地反应出模网混凝土墙体的力学性能和变形特点。如果整个结构体系都运用ANSYS进行分析，会使得单元数量过多，工作量很大，无法在普通台式计算机上实现。

目前国内进行了大量的模网混凝土结构体系的研究工作，对模网内部各个材料的力学性能分别进行了分析，得出它们在抗剪、抗弯中所起到的作用。并验证了其整体破坏形态和变形性能，最终给出了模网混凝土墙体的计算方法。由于其水平方向的钢筋在整个墙体上不连续，在剪力如何传递的问题上还不是很清楚。因此本文用有限元理论对墙体进行局部分析，即对墙体施加X方向的水平位移，直至墙体出现开裂，从而观察墙体的变形和裂缝分布情况，得出较为精确可靠的结果。

4.2 本构关系

4.2.1 假设条件

由于模网混凝土墙体与普通的剪力墙在材料组成和构造措施等方面存在着一定的差异。而这些都成为影响模网混凝土墙体性能的影响因素。普通剪力墙并不具备模网体系的特有性能，因此，出为了使水平拉筋、加劲肋都能得到充分利用。需要建立这一墙体材料的本构关系^[33]。

并采用如下假设：

- (1) 模网混凝土墙由三种材料组成：混凝土、钢筋、加劲肋（折算为竖向钢筋）^[15]；
- (2) 不考虑钢筋、加劲肋与混凝土之间的相对滑移，其间位移完全协调；
- (3) 材料均为各向同性材料。

4.2.2 混凝土的应力—应变曲线的数学模型

$$\text{当 } \varepsilon \leq \varepsilon_0, \quad \sigma = f_c \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]$$

$$\text{当 } \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u, \quad \sigma = f_c \left[1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_u}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right]$$

式中 f_c ——峰值应力；
 ε_0 ——对应峰值应力的应变，取 $\varepsilon_0 = 0.002$ ；
 ε_u ——极限压应变，取 $\varepsilon_u = 0.0038$ ；

4.2.3 钢筋的应力—应变曲线的数学模型

$$\text{当 } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y, \quad \sigma = E_s \varepsilon_s$$

$$\text{当 } \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,u}, \quad \sigma = f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_y) \tan \theta$$

式中， $\tan \theta = 0.01 E_s$

4.2.4 屈服准则

本文采用 Mises 屈服准则^[21]。

Mises 屈服条件为：

$$F(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma} - \sigma_s = 0$$

其中， $\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$

$\bar{\sigma}$ ，——等效应力；

σ_s ——单向应力状态的屈服应力；

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ——各方向的应力；

4.3 计算模型

4.3.1 墙体示意图

模网混凝土墙体示意图（如图 4—1 所示）。

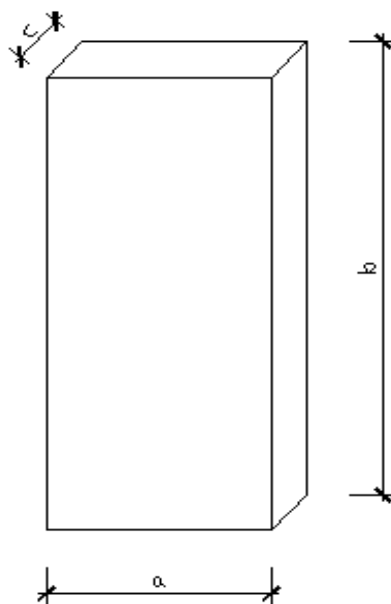


图 4—1 模网混凝土墙体示意图

由于模网墙体的水平筋在相邻的墙体之间是不连续的，所以需要在墙体拼缝处增加竖向附加受力钢筋，相当于在墙体中间配置了一个暗柱，可以提高折钩拉筋锚固性能，使两端中断的折钩拉筋充分发挥作用，同时也提高了墙体延性^[15]。

为了检验相邻两片墙体在荷载作用下其传力的连续性问题，本文选取两片上述规格的墙片，并根据《建筑模网混凝土结构技术规程》^[16]（本文均简称为《建筑模网规程》）的要求进行了拼接。同时，考虑到计算的顺利收敛问题，在支座处增加刚性垫梁；在上部施加位移荷载处同样增加刚性垫梁（如图 4—2 所示）。以此模型来进行计算分析^{[17] [18] [19]}。

选取模网混凝土墙体中较为常用的几种规格，即不同长度、高度的墙进行分析。由表 4—1 列出。图形如图 4—2 所示。

表 4—1 模网混凝土墙体规格

规格 \ 尺寸	$2a+c$ (mm)	b (mm)	c (mm)
规格 1	2000	2000	160
规格 2	1500	3500	160
规格 3	2000	1500	160

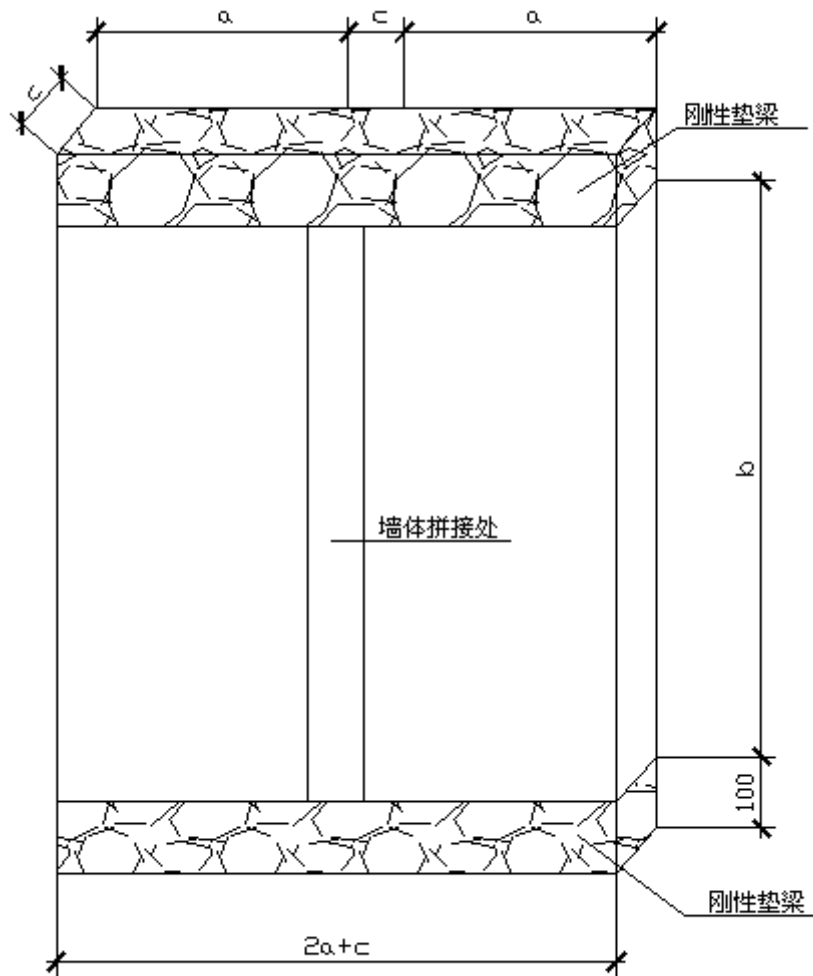


图 4—2 分析模型

4.3.2 单元说明

本文将根据不同单元的类型特点，使用如下三种单元形式^{[20] [21]}。

1. solid45 单元用于构造三维实体结构. 单元通过 8 个节点来定义, 每个节点有 3 个沿着 xyz 方向平移的自由度 (如图 4-3 所示)。

单元具有塑性, 蠕变, 膨胀, 应力强化, 大变形和大应变能力。

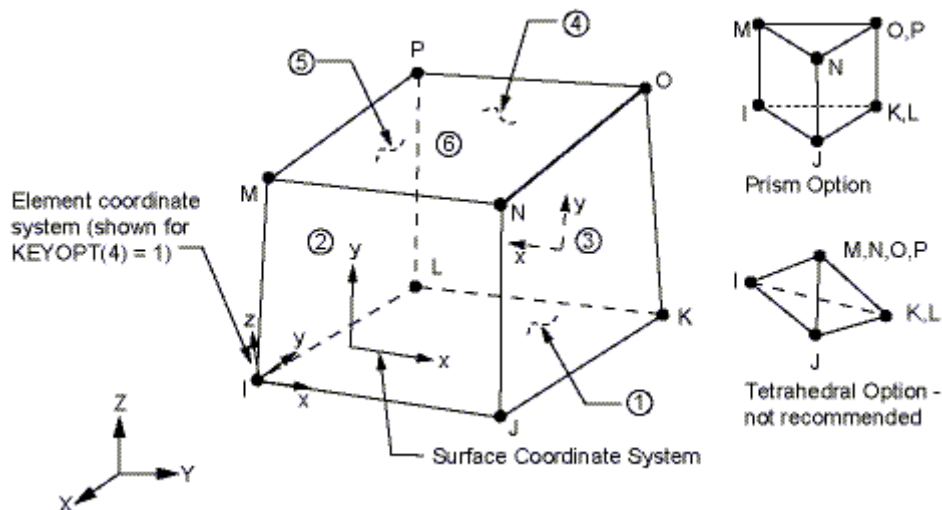


图 4-3 SOLID45 单元

2. SOLID65 单元用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型 (如图 4-4 所示)。该实体模型可具有拉裂与压碎的性能。在混凝土的应用方面，如用单元的实体性能来模拟混凝土，而用加筋性能来模拟钢筋的作用。当然该单元也可用于其它方面，如加筋复合材料 (如玻璃纤维) 及地质材料 (如岩石)。该单元具有八个节点，每个节点有三个自由度，即 x、y、z 三个方向的线位移；还可对三个方向的含筋情况进行定义。

本单元与 SOLID45 单元 (三维结构实体单元) 的相似，只是增加了描述开裂与压碎的性能。本单元最重要的方面在于其对材料非线性的处理。其可模拟混凝土的开裂 (三个正交方向)、压碎、塑性变形及徐变，还可模拟钢筋的拉伸、压缩、塑性变形及蠕变，但不能模拟钢筋的剪切性能。

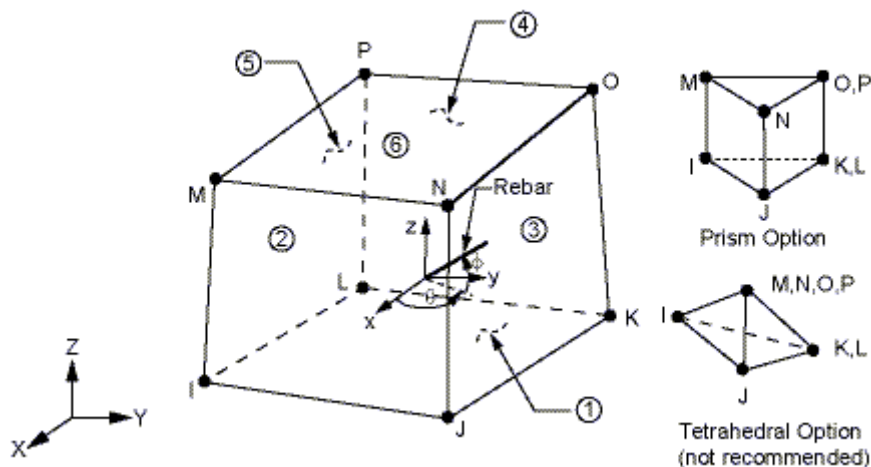


图 4-4 SOLID65 单元

3. PIPE20 单元是具有拉压、弯曲、何扭转性能的单轴单元。单元的每个节点有 6 个自由度：沿节点坐标 x, y, z 方向的位移和绕节点坐标 x, y, z 轴转动（如图 4-5 所示）。

单元具有塑性、蠕变、膨胀特性。如果不需要使用这些特性，用弹性管单元管 16 就可。

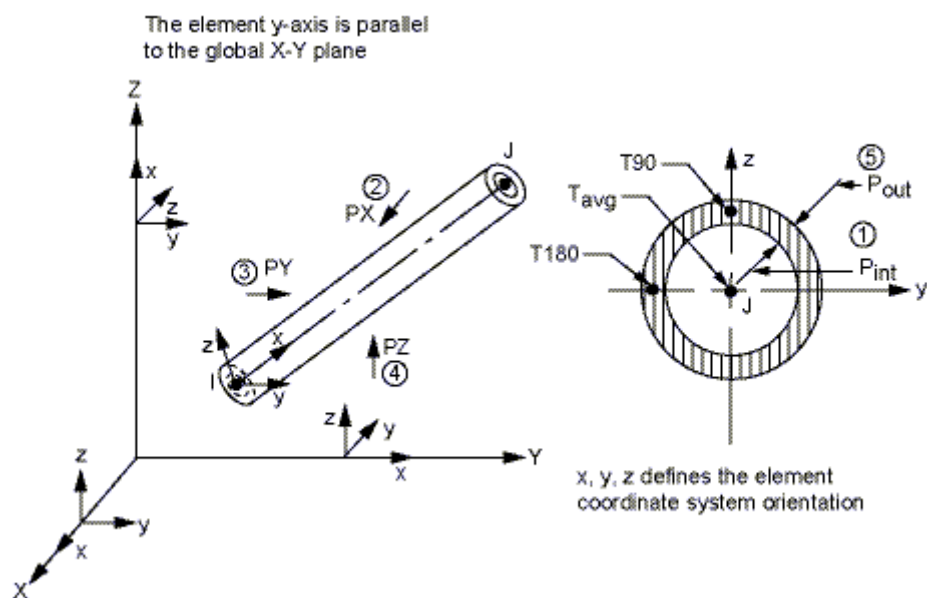


图 4-5 PIPE20 单元

4.3.3 单元选取

根据模网混凝土墙体的受力特点，结合 ANSYS 软件为我们提供的单元类型。

本文选用以下单元，很好的模拟出模网混凝土墙体的实际情况^{[22] [23]}。

混凝土部分选用 solid65 单元；

刚性垫梁选用 solid45 单元；

钢筋（含水平筋和竖向加劲肋）选用 pipe20 单元。

4.4. ANSYS 软件计算及分析

4.4.1 建模分析

建立几何模型，并在上部和下部设置刚性垫梁（如图 4—6 所示）；并对模型和垫梁进行单元的网格划分（如图 4—7 所示）。

合并、压缩在建模时产生的重复的节点和单元，这样有利于程序进行计算和方便进行节点和单元的结果分析。

在墙的上部施加竖向荷载 2.0MPa。

对模型上部施加 X 方向的位移荷载^[24]，设置加载子步，并进行求解。

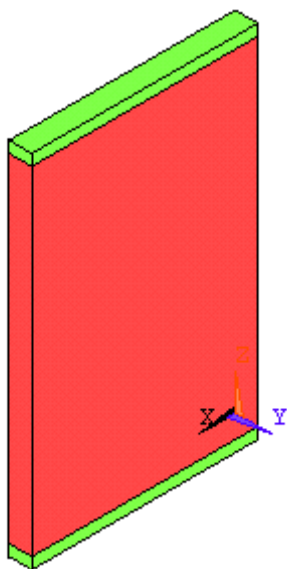


图 4—6 几何模型

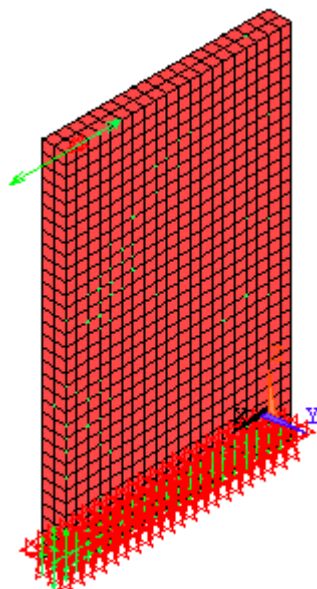


图 4—7 单元的网格划分

4.4.2 计算结果的数据分析

对软件的分析结果进行整理,得到不同规格墙体所受的荷载和位移。如表 4-2、表 4-3 所示。

表 4-2 墙体的荷载

墙体规格	开裂荷载 (KN)	屈服荷载 (KN)	极限荷载 (KN)
规格 1	391.2	652.5	831.6
规格 2	240.1	450.6	500.2
规格 3	520.8	738.2	980.3

表 4-3 墙体的位移

墙体规格	开裂位移 (mm)	屈服位移 (mm)	极限位移 (mm)
规格 1	0.63	2.26	7.33
规格 2	1.20	10.61	16.21
规格 3	0.32	0.87	2.26

4.4.3 计算结果的图形分析

规格 1 的墙体在实际应用中较为常见,因此本文选取规格 1 进行图形分析。

1. 观察变形图(如图 4-8 所示),模型发生了 X 方向的侧向位移,在拼接处没有明显的局部裂缝。这一结果说明在荷载的作用下,模网混凝土墙体整体发生变形,其变形是连续的。

2. 通过观察节点的主应变(如图 4-9 所示),最大主应变的主要分布区域位于模型中部约 45 度的斜线附近。这一结论与普通剪力墙进行的承载力的实验结果相似。

3. 本文选择开裂位置作为积分点,得到了积分点的开裂状态图(如图 4-10 所示)可以观察到模型下部由于有支座约束的作用均发生开裂。模型中部沿着约 45 度的斜线处开裂。这一结论支持《建筑模网规程》中模网混凝土墙体的破坏形式与普通剪力墙相近的描述。

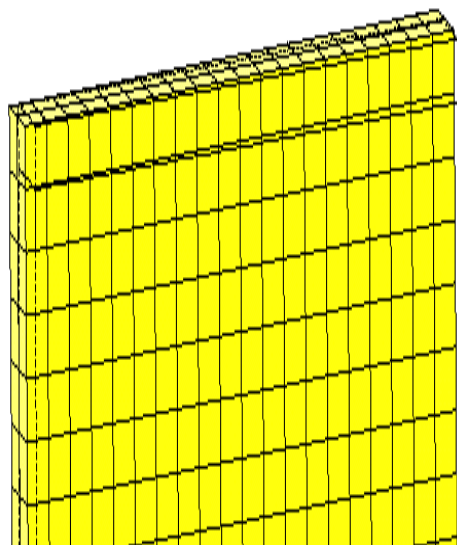


图 4-8 变形图

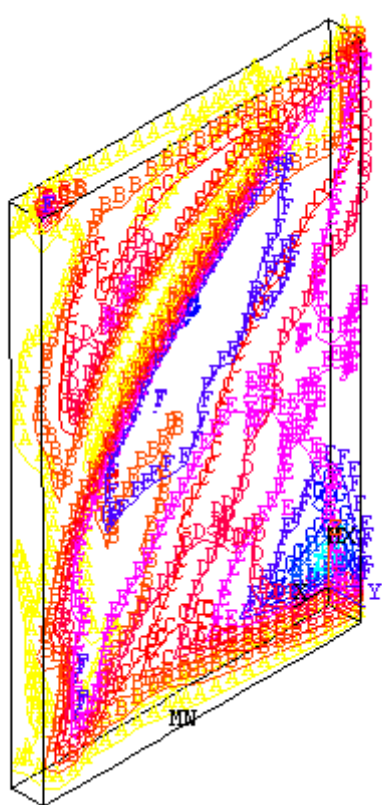


图 4-9 应变分布图

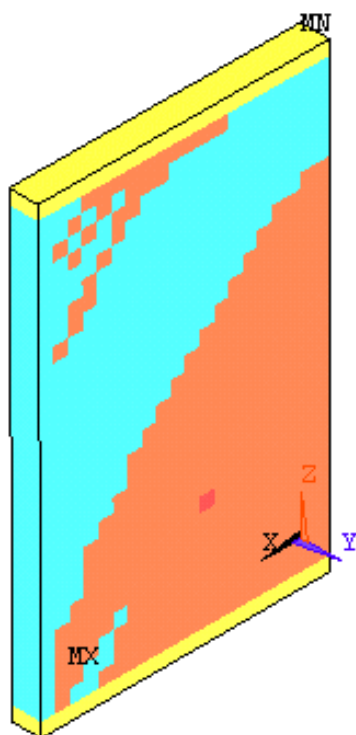


图 4-10 积分点开裂状态

4.5 模网结构的复合材料特性

由于在之后的模网混凝土墙体整体结构模型分析时，运用 ETABS 软件无法像 ANSYS 这样模拟模网墙体的各个组成部分。因此本文试图找出使用于模网混凝土墙体复合材料的本构关系^{[25] [26] [27]}。

4.5.1 复合材料的应力

$$\sigma = \frac{\sigma_c A_c + \sigma_{s1} A_{s1} + \sigma_{s2} A_{s2}}{A_c + A_{s1} + A_{s2}} = (1 - \rho_1 - \rho_2) \sigma_c + \rho_1 \sigma_{s1} + \rho_2 \sigma_{s2}$$

4.5.2 复合材料的弹性模量

$$E = \frac{E_c A_c + E_{s1} A_{s1} + E_{s2} A_{s2}}{A_c + A_{s1} + A_{s2}} = (1 - \rho_1 - \rho_2) E_c + \rho_1 E_{s1} + \rho_2 E_{s2}$$

其中， E ， E_c ， E_{s1} ， E_{s2} ——复合材料弹性模量，混凝土弹性模量，钢筋弹性模量，加劲肋弹性模量；

σ ， σ_c ， σ_{s1} ， σ_{s2} ——复合材料应力，混凝土应力，钢筋应力，加劲肋应力；

A_c ， A_{s1} ， A_{s2} ——混凝土面积，钢筋面积，加劲肋面积；

ρ_1 ， ρ_2 ——钢筋配筋率，加劲肋配筋率；

由此确定的复合材料的应力—应变关系，并在定义材料属性时输入。采用 solid65 单元，进行分析。并与之前的结果相比较，见表 4—4、表 4—5。

表 4—4 墙体荷载

墙体 规格	开裂荷载（KN）			屈服荷载（KN）			极限荷载（KN）		
	本构 关系 1	本构关 系 2	比值	本构关 系 1	本构 关系 2	比值	本构 关系 1	本构 关系 2	比值
规格 1	391.2	326.8	1.20	652.5	553.0	1.18	831.6	716.9	1.16
规格 2	240.1	218.2	1.09	450.6	425.1	1.06	500.2	476.4	1.05
规格 3	520.8	441.3	1.18	738.2	653.3	1.13	980.3	845.1	1.16

表 4—5 墙体位移

墙体规格	开裂位移 (mm)			屈服位移 (mm)			极限位移 (mm)		
	本构关系 1	本构关系 2	比值	本构关系 1	本构关系 2	比值	本构关系 1	本构关系 2	比值
规格 1	0.63	0.54	1.17	2.26	1.89	1.20	7.33	6.21	1.18
规格 2	1.20	1.12	1.07	10.61	10.1	1.05	16.21	15.01	1.08
规格 3	0.30	0.26	1.17	0.87	0.75	1.16	2.23	1.99	1.12

从不同规格的墙体的荷载和位移的比值来看。虽然建立有限元模型的时候对于混凝土、钢筋、加劲肋等材料的模拟形式不同，对于模网混凝土墙体的本构关系的处理方法不同，但是这两种结果分析结果的比值在 1.0~1.2 之间，结果相差不大。

由于第一种分析方法的计算结果能够很好地与模网混凝土墙体的实际受力情况相吻合^[15]，而且第二种分析方法的结果又与第一种分析方法相一致。故可证明第二种分析方法的准确性，复合材料的本构关系的选取具有一定的合理性。

第五章 模网混凝土结构体系的抗震性能分析

本章运用第四章总结出的模网混凝土结构的本构关系，采用 ETABS 建筑结构专用分析与设计软件，对一个 12 层的工程实例进行了模网混凝土结构的整体抗震性能分析，并和 PKPM 系列的 SATWE 软件的计算结果进行了对比分析，验证了 ETABS 软件这一合理化的分析方法。然后对该工程进行了层数从 8 层至 24 层的改变，进一步总结了结构高度和墙肢轴压比对结构抗震性能的影响。

5.1 工程算例概述

5.1.1 工程建筑情况

(1) 建筑情况

本算例为某综合办公楼，地上 12 层，总高度 36m，层高均为 3 米。建筑平面图如图 5-1 所示。建筑立面图如图 5-2，5-3 所示。立体效果图如图 5-4，图 5-5 所示。

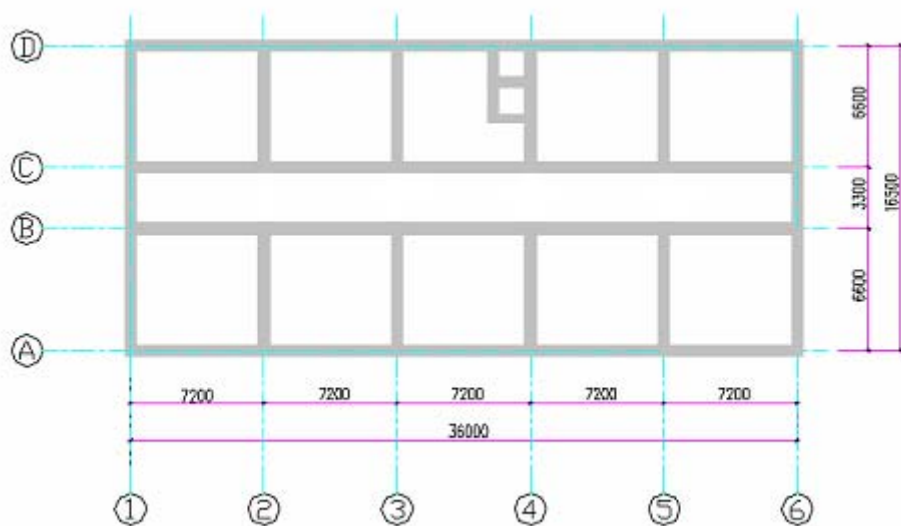


图 5-1 建筑平面图

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/365341132034011130>